Audio-effecten creëren

Bij het elektronisch verwerken van audio van muziekinstrumenten worden effecten zoals nagalm, echo, chorus, phasing en vibrato aan het geluid toegevoegd. Dat kan nog steeds uitstekend met analoge elektronica, zoals bijvoorbeeld effect-pedalen bewijzen. In dit artikel leest u hoe u dat zélf kunt doen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 30-01-2020

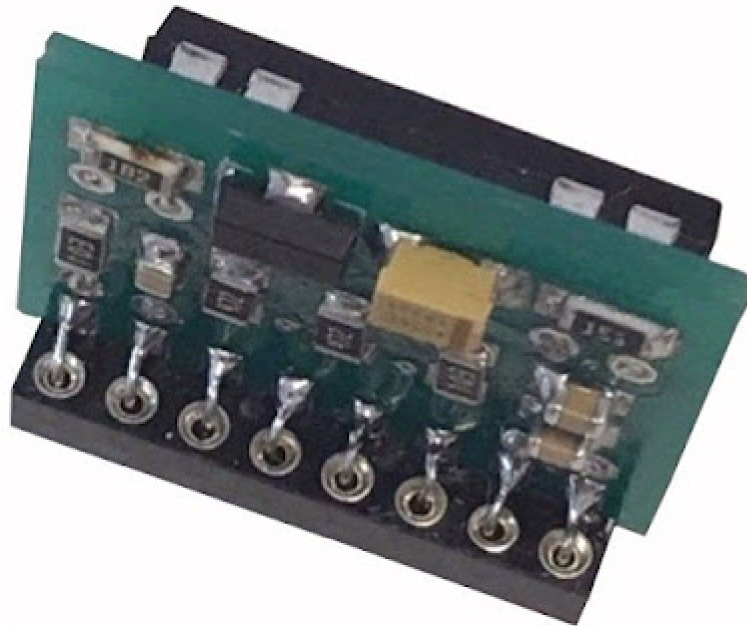
Inleiding

Waarom elektronisch als het via software kan?
Tegenwoordig kunt u op een vrij goedkope manier beschikken over uitstekende programma's waarmee u de meest vervreemdende effecten en filters op audio kunt toepassen. Waarom dus nog de moeite doen om elektronische schakelingen te ontwerpen die hetzelfde doen? Omdat u, als elektronisch knutselen uw hobby is, het interessant en leerzaam vindt om met de soldeerbout en een handjevol elektronische onderdelen zélf bijvoorbeeld een nagalm in elkaar te sleutelen.
Bovendien kunt u dergelijke elektronische schakelingen rechtstreeks in real-time op het analoge geluid van bijvoorbeeld een elektronisch muziekinstrument toepassen. Dat gebeurt bijvoorbeeld in de effect-pedalen die bij iedere elektronische gitaar worden toegepast voor het vervormen van het geluid. Met de genoemde programma's lukt dat uiteraard niet, want dan moet u uw geluid als .WAV- of .MP3-bestand op de harde schijf of stick hebben staan voordat u ermee aan de slag kunt.



Effect-pedalen die gebruik maken van de in dit artikel beschreven technieken. (© Pinterest)

Hebt u speciale onderdelen nodig?
Behalve weerstanden, condensatoren, transistoren en op-amp's hebt u slechts één soort niet alledaagse onderdelen nodig. Dat zijn analoge vertragingslijnen die een audiosignaal over een bepaald aantal milliseconden kunnen vertragen. Voor het vertragen van een audiosignaal bestaan verschillende systemen. U kunt bijvoorbeeld een analoge vertragingslijn als kant-en-klare module kopen, zie de onderstaande foto. Het meest hobby-achtige is echter gebruik te maken van *'emmertjesgeheugens'* of *'bucket brigade delay's'*. Dat zijn oeroude analoge IC's die dank zij een paar in audio-elektronica gespecialiseerde bedrijfjes nu een tweede jeugd beleven en weer courant leverbaar zijn.



Een analoge vertragingslijn als insteek-module. (© Synthechnics)

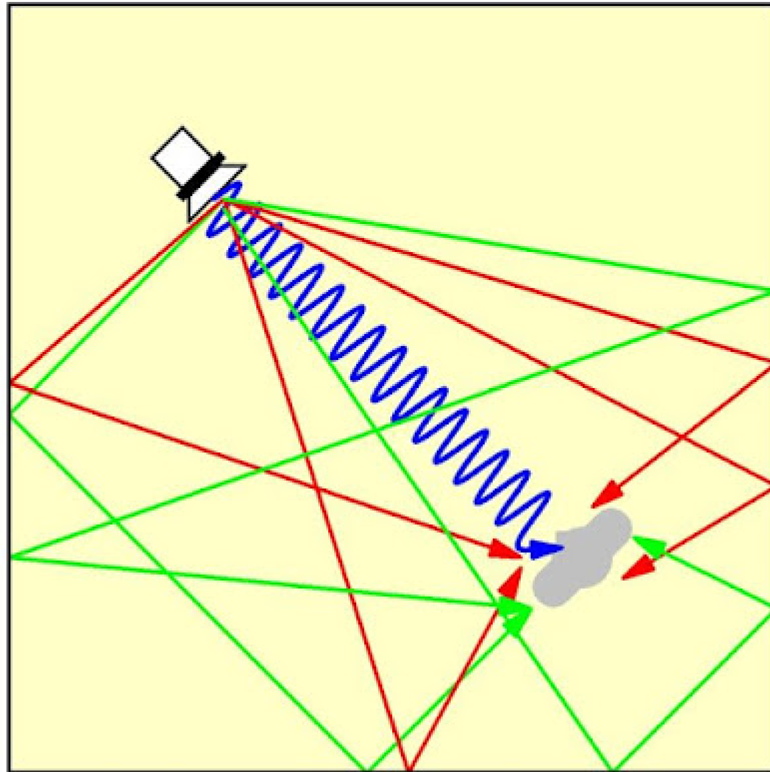
Welke audio-effecten en -filters worden in dit artikel behandeld?
Dat zijn er heel wat en misschien hebt u de naam van sommigen nog nooit gehoord of gelezen:

- Nagalm.
- Echo.
- Automatic Double Tracking.
- Multiple Voice Effect.
- Chorus.
- Phasing (flanging).
- Vibrato.
- Haas compensatie.
- Eerste golffront compensatie.
- Klik onderdrukking.
- Kamfilter.
- Transversaal filter.

De nagalm- en echo-effecten

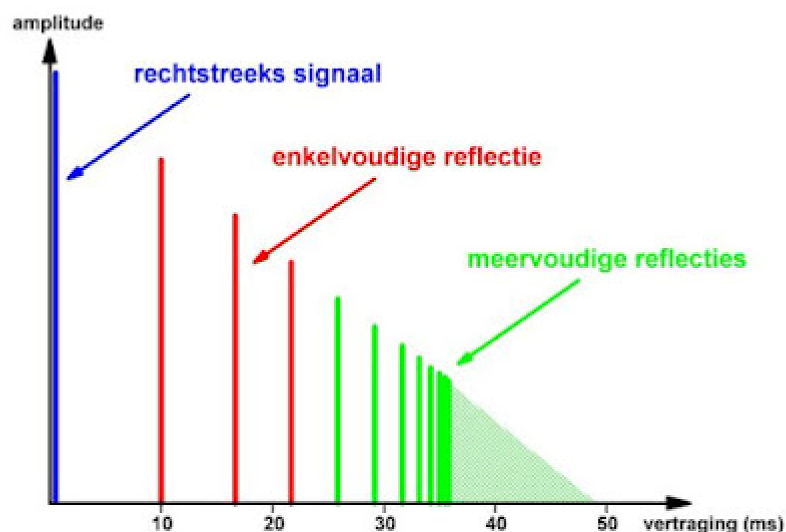
Wat is nagalm?
Nagalm is een akoestisch effect dat in iedere ruimte optreedt vanwege het natuurkundige gegeven dat geluid uit drukgolven bestaat en deze drukgolven tegen de wanden van de ruimte reflecteren. Als er, zoals getekend in de onderstaande figuur, in een ruimte één geluidsbron aanwezig is, dan zullen de drukgolven die door deze bron geproduceerd worden zich in alle richtingen uitbreiden.
Als de golffronten de wanden raken wordt een gedeelte van de golfenergie geabsorbeerd en een gedeelte weerkaatst. Op deze manier ontstaan een in principe oneindig aantal paden tussen de geluidsbron en de luisteraar.
Het directe pad is door een blauwe lijn voorgesteld. Dit geluid legt de kortste weg af tussen bron en luisteraar en dringt dus onvertraagd in de oren van de luisteraar. Met rode lijnen is een aantal paden voorgesteld die ontstaan door enkelvoudige reflectie. Deze leggen een langere weg af en komen dus iets vertraagd bij de luisteraar terecht. De paden die door een groene lijn zijn voorgesteld ontstaan door twee- of meervoudige weerkaatsing.
Als de geluidsbron een zeer korte klik produceert, dan zal de luisteraar in principe een heleboel klikjes horen. Nu zal het duidelijk zijn dat niet alle golffronten die de luisteraar bereiken even sterk zijn. Klikjes die worden weerkaatst zijn per definitie zwakker dan het

directe geluid, omdat de wand een deel van de energie absorbeert. Bovendien wordt het geluid zwakker naarmate het een langere weg door de ruimte heeft afgelegd.



Het ontstaan van nagalm in een ruimte met één geluidsbron en één luisteraar. (© 2020 Jos Verstraten)

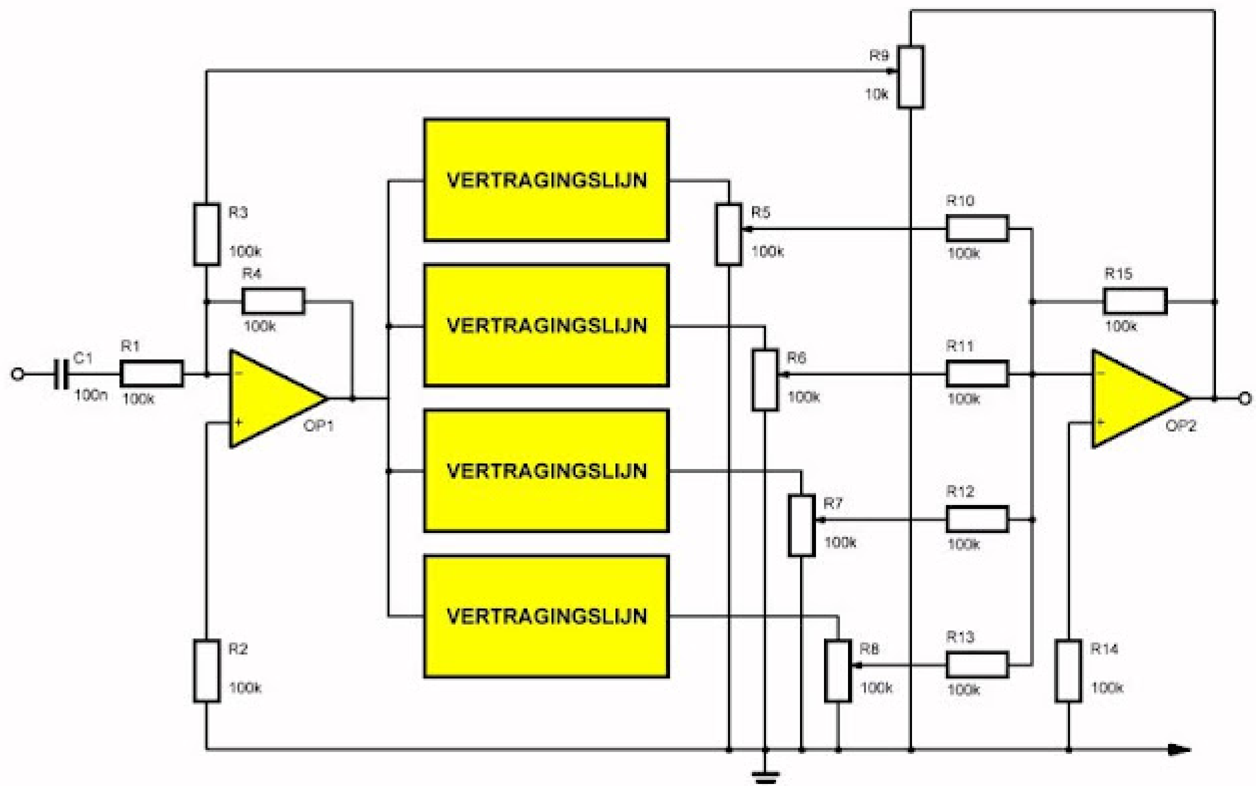
Het amplitude/tijd-diagram
U kunt dus een amplitude/tijd-diagram opstellen, met als resultaat iets dat er uitziet zoals getekend in de onderstaande figuur. Het directe geluid is het sterkst, de diverse reflecties nemen af in amplitude, maar komen ook steeds dichter bij elkaar te liggen in de tijd.



De typische amplitude/vertraging-karakteristiek, die het verschijnsel nagalm veroorzaakt. (© 2020 Jos Verstraten)

Een nagalm schakeling zélf ontwerpen
Als u elektronisch nagalm wil genereren, dan volstaat het echt niet om één vertraging in te bouwen en de uitgang daarvan terug te koppelen naar de ingang. Dat is een goedkoop systeem, dat helaas vaak wordt toegepast, maar een heel kunstmatig effect opwekt. Het grote probleem van een dergelijke schakeling is dat alle galmeffecten dezelfde vertraging hebben, hetgeen duidelijk in tegenspraak is met de karakteristiek van bovenstaande figuur.

Een écht professionele nagalm moet opgebouwd worden volgens het blokschema voorgesteld in de onderstaande figuur.
U moet diverse vertragingslijnen parallel schakelen, die ieder uit een emmertjesgeheugen kunnen bestaan. Iedere vertragingslijn heeft een andere vertraging. De uitgangen worden in een eenvoudige weerstandsmenger met elkaar gemengd. Met de potentiometers is het mogelijk de amplitude van ieder afzonderlijk vertraagd signaal in te stellen. Het uitgangssignaal wordt via een potentiometer teruggekoppeld naar de ingang. Op deze manier zal het vertraagde signaal weer gedeeltelijk op de ingang verschijnen en nog eens vertraagd worden. De schakeling levert dus meer vertragingen dan het aantal toegepaste vertragingslijnen doet vermoeden. Op deze manier komt u het dichtst in de buurt van het effect van reële nagalm.

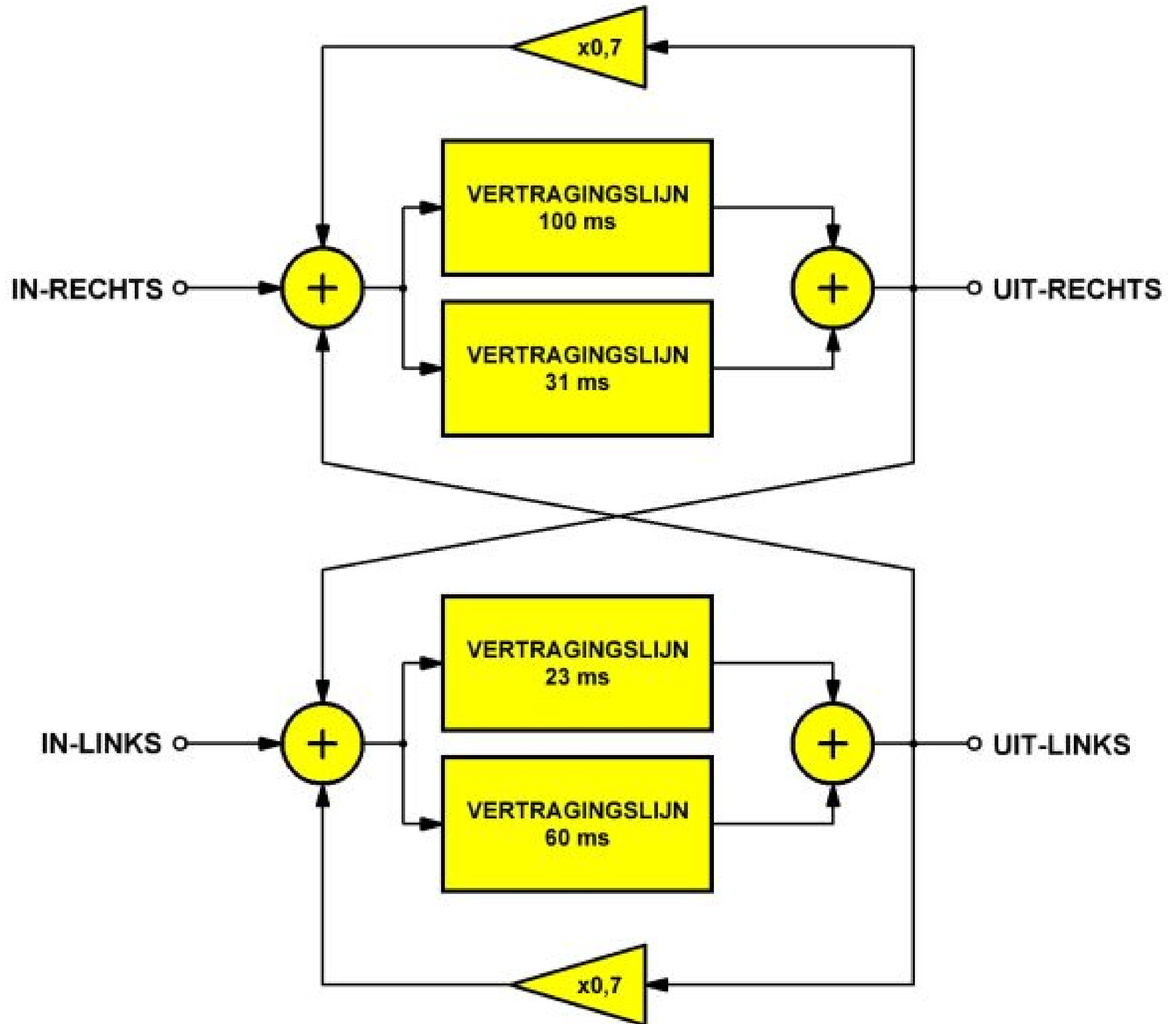


Het blokschema van een professionele nagalm schakeling. (© 2020 Jos Verstraten)

Nog wat praktische tips voor de zelfbouw
Om een natuurlijk effect te bereiken moet u er voor zorgen dat de verschillende vertragingstijden van de emmertjesgeheugens geen gemeenschappelijke veelvouden hebben. Alleen dan zal er een heel spectrum van vertragingstijden ontstaat die niet samenvallen. Bij het dimensioneren van dergelijke schakelingen moet u er rekening mee houden dat de vertragingstijden van de lijnen ergens tussen 10 ms en 100 ms moeten liggen. Het zal duidelijk zijn dat het gebruik van emmertjesgeheugens in dit soort schakelingen erg veel voordelen heeft. Een dergelijke schakeling digitaal ontwerpen geeft een tamelijk ingewikkeld geheel. Ieder digitaal vertraagd signaal moet immers met een eigen DAC weer omgezet worden in een analoog signaal. Deze stap vervalt als u gebruik maakt van emmertjesgeheugens.

Nagalm in een stereo systeem
Als u nagalm wilt toepassen in een stereo systeem kunt u natuurlijk twee schakelingen volgens het bovenstaande blokschema ontwerpen. Een veel beter idee is gebruik te maken van de schakeling die is voorgesteld in de onderstaande figuur. Hierin worden ook vier emmertjesgeheugens toegepast. Twee zitten in het signaalpad van het linker kanaal, twee zitten rechts.
De vier vertragingslijnen hebben verschillende vertragingstijden. Er zijn diverse terugkoppelingen aanwezig. Op de eerste plaats wordt de uitgang van ieder kanaal teruggekoppeld naar de eigen ingang, met een signaalverzwakking van ongeveer 0,7. Daarnaast gaat de uitgang van het linker kanaal naar de ingang van het rechter kanaal en

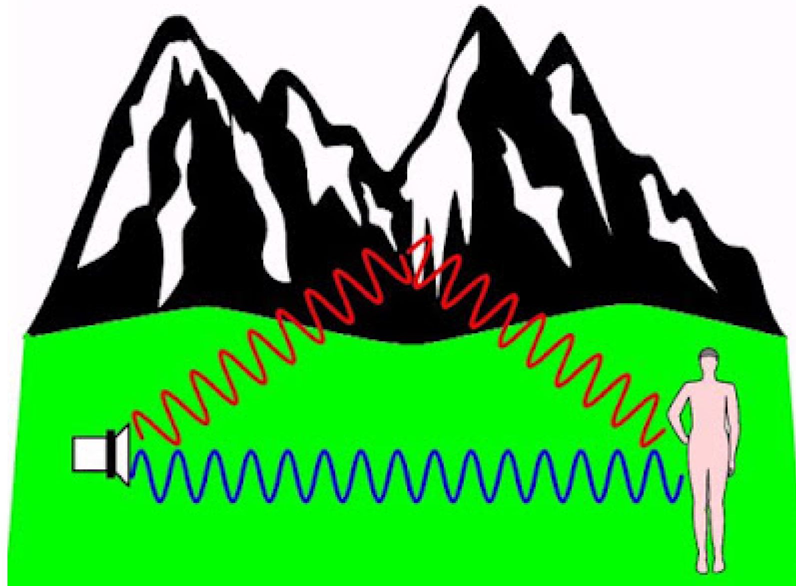
vice versa. Op deze manier ontstaan zeer veel nagalmeffecten, ieder met een eigen vertraging en een eigen amplitude. De karakteristiek van natuurlijke nagalm wordt zeer realistisch benaderd. Let even op de vertragingstijden! De tijden van 23 ms, 31 ms, 60 ms en 100 ms zijn zo gekozen dat deze geen gemeenschappelijke veelvouden hebben. Natuurlijk hebben 100 ms en 60 ms een eerste gemeenschappelijk veelvoud van 600 ms. Maar die tijd wordt eerst bereikt nadat het 60 ms signaal tien keer door het systeem is gegaan en het 100 ms signaal zes keer. Op dat moment zijn de signalen zo verzwakt dat zij geen zinvolle bijdrage meer leveren aan het gezamenlijk signaal.



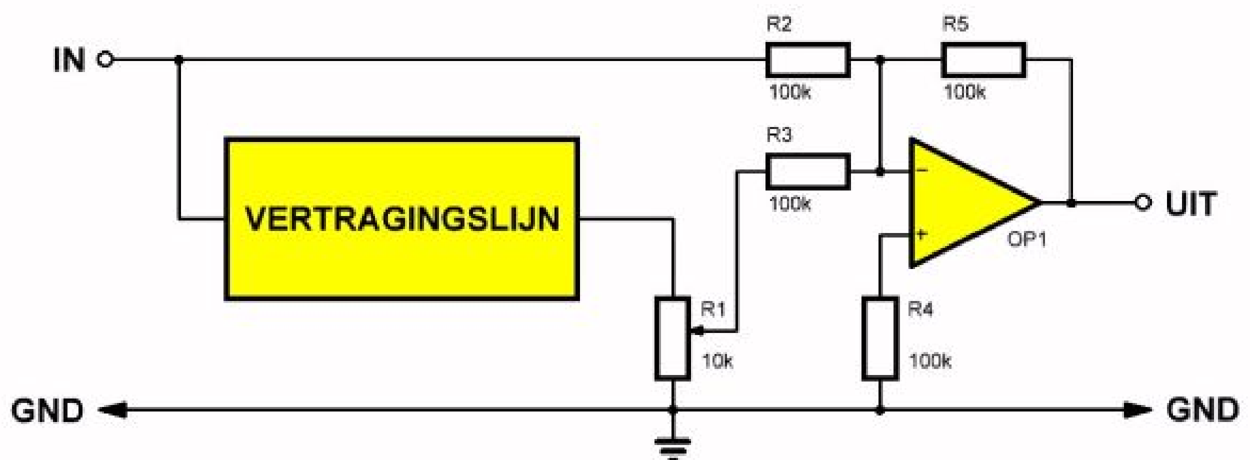
Het toepassen van nagalm in een stereo systeem. (© 2020 Jos Verstraten)

Wat is echo?

Hoewel de natuurkundige basis van beide verschijnselen hetzelfde is, zijn echo en nagalm niet met elkaar te vergelijken. Echo ontstaat in de vrije lucht, zie de onderstaande figuur, doordat de geluidsgolf van een geluidsbron terug kaatst tegen een op verre afstand gelegen voorwerp zoals een berg of een groot gebouw. Er bestaat dus een tamelijk groot tijdsverschil tussen de directe geluidsgolf en de echo ervan. Geluid plant zich immers voort in de lucht met een snelheid van ongeveer 300 m/s. Als de berg 300 meter van de geluidsbron ligt, moet het geluid 600 meter afleggen en u kunt de echo dus na ongeveer twee seconde horen.


Het ontstaan van een echo. (© 2020 Jos Verstraten)

Echo elektronisch genereren
Wilt u een echo-effect elektronisch genereren, dan moet u dus het geluid over seconden vertragen, hetgeen kan volgens het blokschema van de onderstaande figuur. De vertragingslijn moet nu uit heel veel cellen bestaan en de toegepaste klokfrequentie moet zo laag zijn als maar mogelijk is. Wel moet opgemerkt worden dat emmertjesgeheugens zich niet zo goed lenen voor het samenstellen van dergelijke grote vertragingen. Door het groot aantal noodzakelijke cellen zal er vrij weinig overblijven van het ingangssignaal.



Het blokschema van een echo-schakeling. (© 2020 Jos Verstraten)

Automatic Double Tracking en Multiple Voice Effect

Automatic Double Tracking
Door *'ADT'* toe te passen kunt u een stem of een solo-instrument voller laten klinken. Het komt er op neer dat het signaal gemengd wordt met een identiek signaal, dat echter een paar milliseconde vertraagd is. Het menselijk gehoor is dan niet meer in staat twee afzonderlijke signalen waar te nemen, maar interpreteert de vertraging als behorende bij het originele signaal. Voor deze toepassing kunt u dezelfde schakeling gebruiken als voor echo. Alleen moet de vertragingstijd nu ingesteld worden op een paar tientallen ms. Dat kan heel goed met een emmertjesgeheugen.

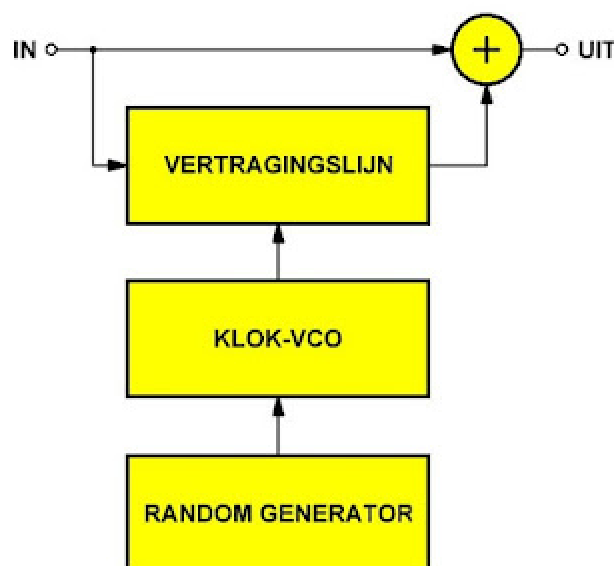
Multiple Voice Effect

Dit is een uitbreiding op het ADT-principe. Nu wordt het originele geluid gemengd met diverse signalen, die over verschillende tijden zijn vertraagd. Het lijkt nu net alsof een heel koor staat te zingen, terwijl er toch maar één stem wordt opgenomen door de microfoon. Het zal duidelijk zijn dat u voor het bereiken van dit effect dezelfde schakelingen als voor nagalm kunt toepassen, waarbij u de vertragingen echter veel kleiner moet instellen.

De chorus- en phasing-effecten

Wat is chorus?
Bij chorus wordt een geluidssignaal niet over een constante tijd vertraagd, maar door een steeds wisselende tijd. Hierdoor ontstaat een zeer speciaal effect, dat eigenlijk niet te beschrijven is, maar dat u moet beluisteren.

Elektronisch chorus genereren
Het blokschema van een chorus schakeling is getekend in de onderstaande figuur. De klokoscillator moet nu uitgevoerd worden als VCO, dus als spanningsgestuurde oscillator. De uitgangsfrequentie van een dergelijke schakeling is recht evenredig met de grootte van een stuurspanning. Deze stuurspanning wordt gegenereerd door een random generator. Zo'n generator wekt een schijnbaar willekeurig variërende spanning op.
De onderstaande schakeling is een heel eenvoudige chorus. Wie het echt professioneel wilt aanpakken, grijpt terug op het schema van de nagalm-schakeling. Iedere vertragingslijn heeft dan een eigen VCO en een eigen toevalsgenerator.



Het blokschema van een chorus-schakeling. (© 2020 Jos Verstraten)

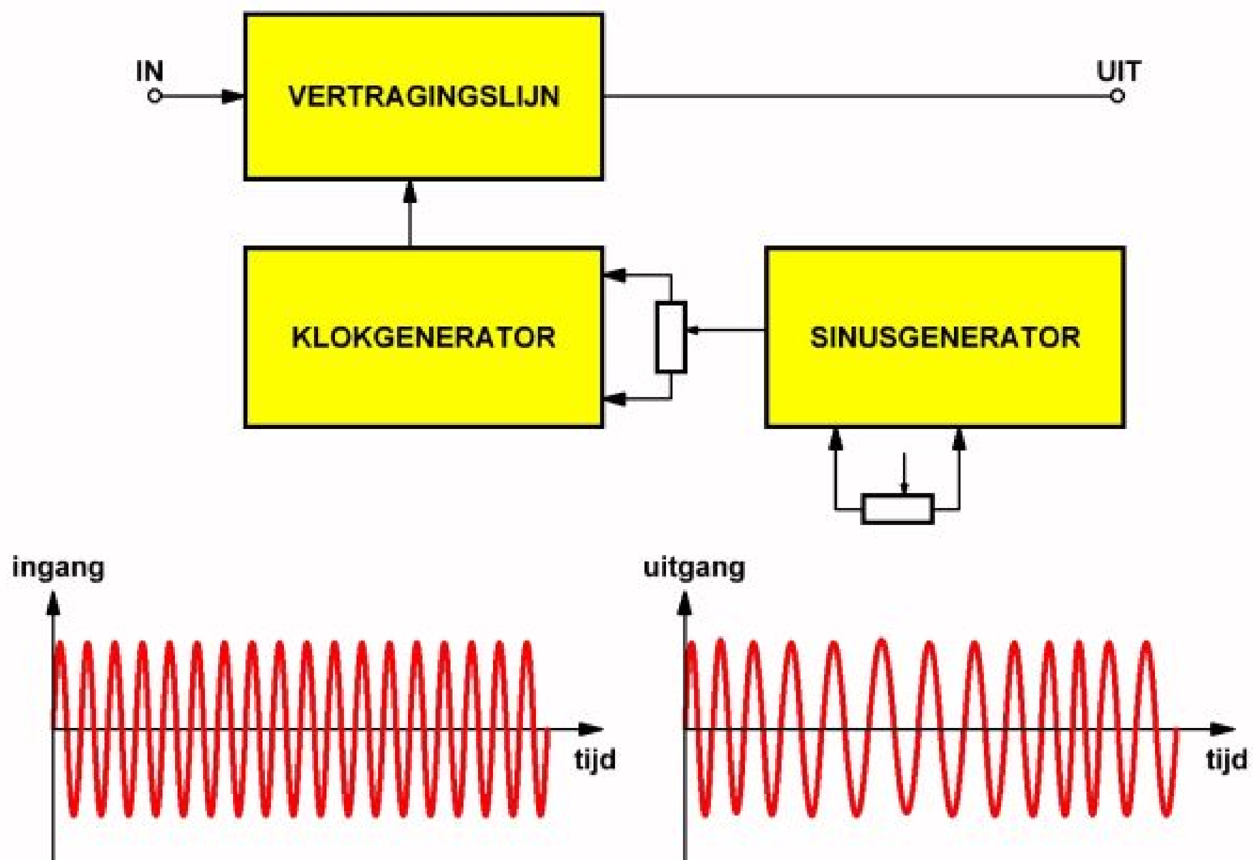
Phasing (flanging)
Phasing, ook wel flanging genoemd, ontstaat als u het geluidssignaal mengt met een vertraagd signaal, waarvan de vertragingstijd heel laagfrequent wordt gevarieerd. Het phasing effect geeft een ruimtelijke indruk aan het geluid, net alsof er een straaljager door de muziek wordt gestuurd. De vertragingstijden liggen tussen 1 ms en 20 ms, waarbij dit bereik wordt doorlopen met een herhalingsfrequentie tussen 0,1 Hz en 1 Hz.

Elektronisch phasing genereren
Het zal duidelijk zijn dat ook nu gebruik moet worden gemaakt van een VCO als klokgenerator. Deze wordt nu niet gestuurd uit een random generator, maar uit een sinusoscillator waarvan de frequentie instelbaar is tussen de genoemde grenzen van 0,1 Hz en 1 Hz. Hiervoor kunt u een van de goedkope functiegenerator IC's toepassen zoals de XR2206 of de ICL8038. Er worden immers geen al te hoge eisen gesteld aan de vorm van de

sinus.

Het vibrato-effect

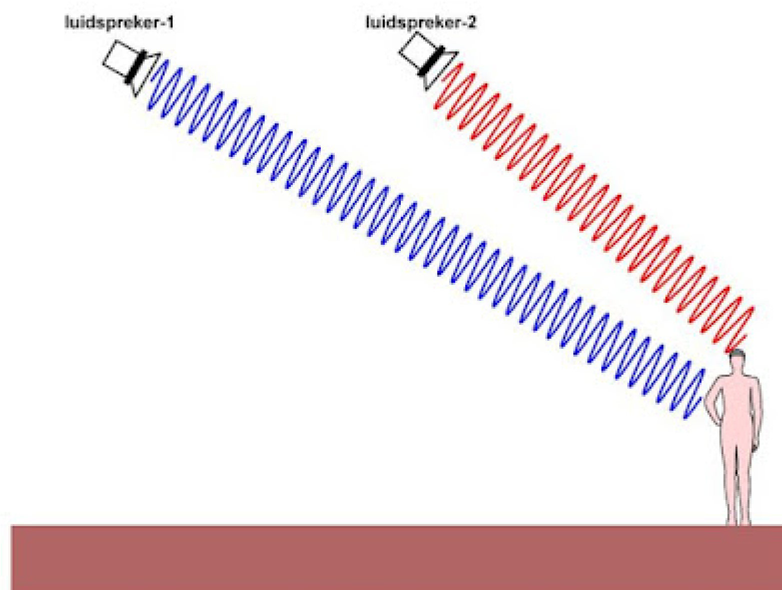
Wat is vibrato?
Bij vibrato wordt de frequentie van een geluidssignaal iets gemoduleerd. Als het geluid afkomstig is van een elektronisch instrument, kunt u die frequentiemodulatie uiteraard in het apparaat zélf inbouwen. Anders zit dit bij niet-elektronische instrumenten en de menselijke stem. Dank zij emmertjesgeheugens kunt u echter op een heel eenvoudige manier de frequentie van een signaal moduleren. De frequentie-afwijking ligt tussen 5 Hz en 10 Hz. Een dergelijke variatie kan eenvoudig worden doorgevoerd door het signaal door een emmertjesgeheugen te sturen, waarvan de klok in frequentie wordt gemoduleerd.
Het blokschema is getekend in de onderstaande figuur, afbeelding waaruit meteen duidelijk wordt hoe de schakeling werkt. Het lijkt in eerste instantie misschien niet erg voor de hand liggend dat een dergelijke eenvoudige schakeling de frequentie van een geluidssignaal kan moduleren. Na enig nadenken wordt dit echter duidelijk. Stel dat u een sinussignaal met een constante frequentie aan de ingang legt. Als de vertragingstijd van het emmertjesgeheugen maximaal is, verschijnt één periode van het ingangssignaal na een bepaalde tijd t1 aan de uitgang.
Als even later de vertragingstijd kleiner is, zal de volgende periode minder vertraagd aan de uitgang verschijnen. Het lijkt dus net alsof de langzame daling van de vertragingstijd tot gevolg heeft dat de perioden van het ingangssignaal worden samengeperst, hetgeen overeen komt met een hogere frequentie. Op dezelfde manier zal een continue verhoging van de vertragingstijd tot gevolg hebben dat de opeenvolgende perioden van het ingangssignaal steeds later aan de uitgang verschijnen. Nu lijkt het alsof de perioden worden uitgerekt, hetgeen te interpreteren is als een verlaging van de frequentie.
De sinus met constante frequentie aan de ingang wordt dus omgezet in een sinus waarvan de periodeduur heel langzaam varieert rond de waarde van de ingangsperiode. Dit effect wekt dus een kleine toonverandering op, typisch een vibrato, dus!



Het principe van vibrato. (© 2020 Jos Verstraten)

Elektronische Haas-compensatie

Wat is het Haas-effect?
Het Haas-effect beweert dat grote looptijd verschillen tussen na elkaar volgende identieke geluidssignalen de verstaanbaarheid ten zeerste beïnvloeden. Dit verschijnsel doet zich voor bij grote geluidsinstallaties, waarbij het geluidssignaal via verschillende eindversterkers aan verschillende luidsprekers wordt toegevoerd. Als deze luidsprekers ver uit elkaar staan, bijvoorbeeld bij een open lucht concert of in een theater, dan zal de beperkte snelheid van het geluid er voor zorgen dat het geluid van de eerste luidspreker iets later de luisteraar bereikt dan het geluid van de tweede luidspreker. Er ontstaan dus looptijd verschillen. Als die looptijd verschillen groter zijn dan 50 ms neemt de verstaanbaarheid van het geluid behoorlijk af. Dergelijke looptijd verschillen treden al op als twee luidsprekers vijftien meter van elkaar verwijderd zijn!



Het ontstaan van het Haas-effect. (© 2020 Jos Verstraten)

Elektronische Haas-compensatie
De oplossing is erg voor de hand liggend. U schakelt voor iedere eindversterker een emmertjesgeheugen. De vertragingstijden van de schakelingen worden nu zo afgeregeld dat de looptijd verschillen worden gecompenseerd. Het principe is eenvoudig, de praktijk echter niet! Natuurlijk is het best mogelijk de looptijd verschillen voor één luisteraar te minimaliseren. Maar het gevolg zal vaak zijn dat deze voor een andere luisteraar net groter worden. Er komt dus heel wat ervaring, slepen met luidsprekers en experimenteren aan te pas om de verstaanbaarheid voor het gehele publiek te optimaliseren. Een praktijkregel is dat op geen enkele plaats looptijd verschillen mogen ontstaan die groter zijn dan 20 ms.

De eerste golffront compensatie (precedence effect)

De wet van het eerste golffront
De wet van het eerste golffront of het *'precedence effect'* stelt dat als twee geluiden van diverse kanten een luisteraar bereiken, het geluid dat het eerst komt bepaalt uit welke richting het geluid feitelijk wordt waargenomen. Als u aan beide luidsprekers van een stereo-installatie hetzelfde signaal toevoert, maar het linker signaal iets vertraagt, dan lijkt het alsof het geluid volledig van rechts komt. Deze wet geldt zelfs als u aan de linker luidspreker heel

wat meer vermogen toevoert dan aan de rechter.

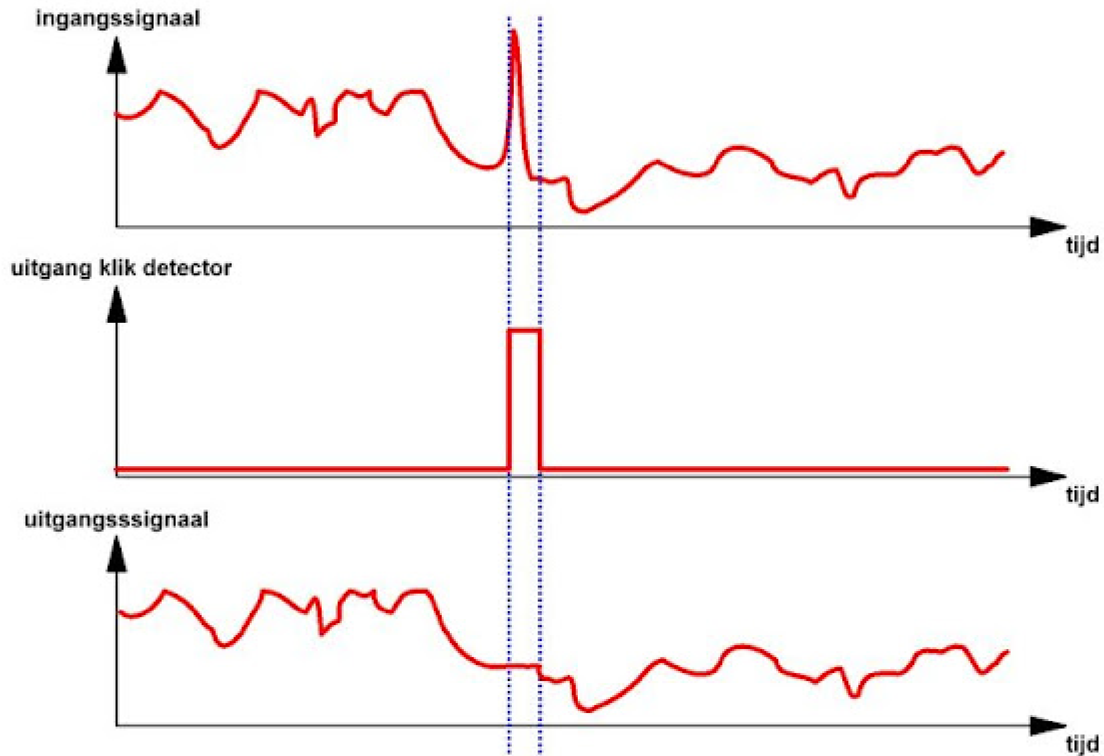
Toepassen van het precedence effect
U kunt de wet van het eerste golffront handig in de praktijk toepassen om bijvoorbeeld het stereobeeld van een bepaalde opname iets aan te passen. Het precedence effect komt ook van pas als u het stereo-beeld van twee niet ideaal opgestelde luidsprekers wilt verbeteren. Het zal duidelijk zijn dat ook nu de vertragende werking van analoge vertragingslijnen goed van pas komt.

Klik onderdrukking

Wat zijn klikken?
Klikken zijn smalle, maar fanatieke stoorpulsen in een audiosignaal. Te denken valt bijvoorbeeld aan de spetters op oude platen of schakelklikken op oude bandopnames.

Het elektronisch onderdrukken van klikken
Ook hier kunt u analoge vertragingslijnen met succes toepassen. Hoe deze techniek werkt valt af te leiden uit het blokschema van de onderstaande figuur. Het te bewerken signaal, bijvoorbeeld het uitgangssignaal van een platenspeler, wordt eerst voorversterkt en dan aan twee schakelingen aangeboden. De ene schakeling is een emmertjesgeheugen met een vaste vertragingstijd van ongeveer 10 ms. De tweede schakeling is een klik detector. Deze onderzoekt het signaal en wekt een uitgangspuls op als er in het ingangssignaal opeens een heel grote spanningssprong voorkomt. Dergelijke sprongen zijn in een muzieksignaal zeer ongewoon, zodat in de meeste gevallen sprake zal zijn van een ongewenste klik of spetter. De detector wekt een uitgangspuls op met een breedte van 20 ms. De uitgangspuls stuurt een *'track & hold'* schakeling van de track- naar de hold-stand. Als deze schakeling in de track-stand staat, wordt het ingangssignaal gewoon doorgekoppeld naar de uitgang. In de hold-stand zal de schakeling echter de momentane waarde van de ingangsspanning vasthouden. Op deze manier wordt de smalle stoorpuls verwijderd. De klik detector detecteert het begin van deze puls en stuurt de track & hold gedurende 20 ms in de hold-stand. De stoorpuls in het ingangssignaal wordt echter 10 ms vertraagd en wordt dus aan de ingang van de track & hold aangeboden op het moment dat deze in de hold-stand staat. De piek dringt bijgevolg niet door tot de uitgang. Het even vasthouden van het signaal op de hold-waarde zal wel hoorbaar zijn, maar in ieder geval veel minder storend dat de klik of spetter.

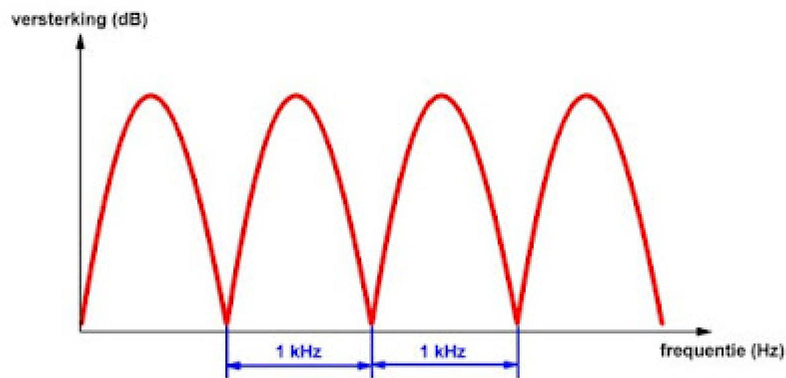




Blokschema van en spanningsvormen in een klik onderdrukker.
(© 2020 Jos Verstraten)

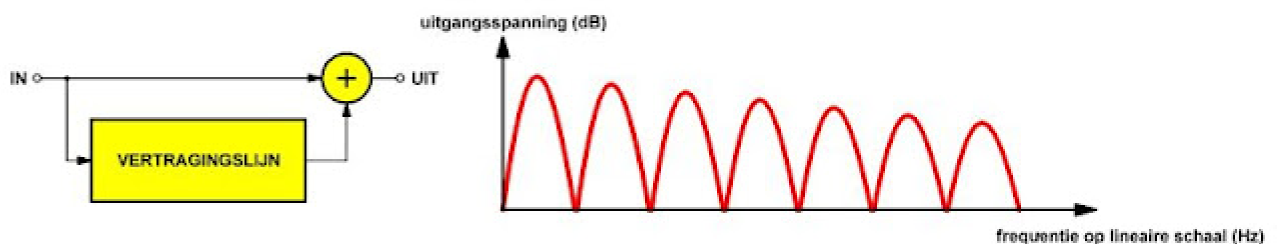
Kamfilters en transversaal filters

Wat is een kamfilter?
Een kamfilter is een heel speciaal filter dat in de professionele analoge elektronica vaak wordt toegepast. Dergelijke filters zult u vrij vaak aantreffen in effectapparatuur voor geluid. Als u de uitgangsspanning van een kamfilter opneemt in functie van de frequentie, dan ontstaat de typische karakteristiek van de onderstaande figuur. Let op dat in deze grafiek de frequentie-as een lineaire indeling heeft en geen logaritmische zoals gebruikelijk!
Er zijn bepaalde frequenties die *'volledig'* verzwakt worden. Hoewel het bij een zuiver wiskundig berekend kamfilter inderdaad zo is dat deze frequenties volledig verzwakt worden, zal een praktisch kamfilter deze frequenties ongeveer 20 tot 30 dB verzwakken. De onderdrukte frequenties liggen op een onderlinge afstand die bepaald wordt door de vertragingstijd van de toegepaste analoge vertragingslijn. Heeft deze een vertraging van 1 ms, dan liggen de onderdrukte frequenties precies 1 kHz uit elkaar. De relatie is dus uiterst simpel: de onderdrukkende frequentie liggen op een frequentie-afstand van elkaar, die gegeven wordt door de formule:
$f_o = 1 / \Delta t$
waarin Δt de vertragingstijd van de toegepaste analoge vertragingslijn is.



De amplitude/frequentie-karakteristiek van een kamfilter.
(© 2020 Jos Verstraten)

Het kamfilter in de praktijk
U kunt een kamfilter samenstellen met een analoge vertragingslijn door de schakeling van de onderstaande figuur toe te passen. De in- en de uitgangsspanning worden in een sommeerversterker bij elkaar opgeteld.
Door de vertraging van de vertragingslijn te variëren kunt u het aantal *'tanden van de kam'* in de filterkarakteristiek aanpassen. Hoe groter de vertraging, hoe meer tanden er in de karakteristiek zullen voorkomen.
De werking van een kamfilter is eenvoudig te verklaren. U kunt ieder ingangssignaal, hoe complex ook van vorm, ontleden in een groot aantal zuiver sinusvormige spanningen. Dat volgt uit de theorie van Fourier. Bij bepaalde frequenties zorgt de vertraging van het emmertjesgeheugen ervoor dat de sinus aan de uitgang in tegenfase is met de sinus aan de ingang. Als u deze signalen optelt blijft er niets van over! Dergelijke frequenties zullen dus in theorie volledig verzwakt worden in de sommeerversterker.

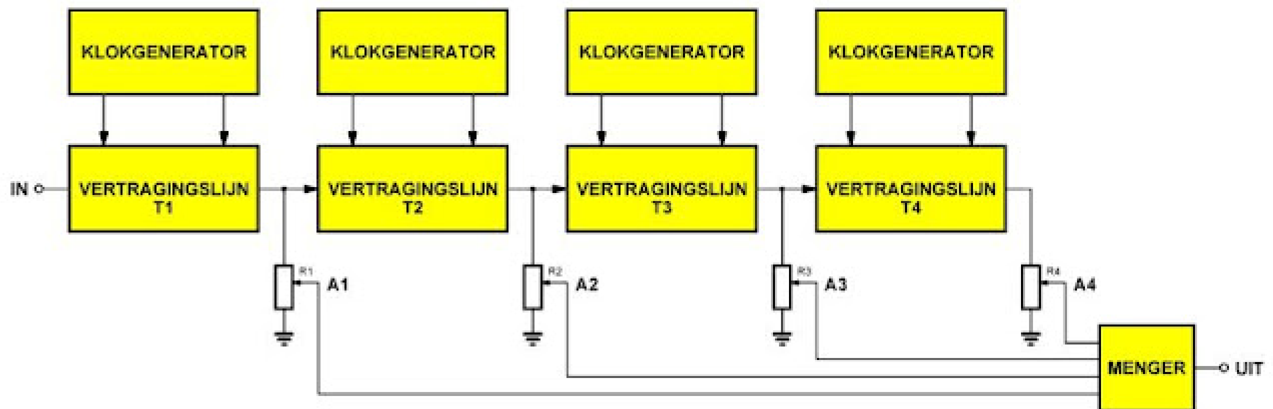


Het blokschema van een kamfilter met een emmertjesgeheugen.
(© 2020 Jos Verstraten)

Wat is een transversaal filter?
Het transversaal filter is het meest universele filter dat de elektronica heeft kunnen bedenken. Met een dergelijk filter kunt u iedere frequentiekarakteristiek nabootsen. Wilt u een filter dat alle frequenties boven 20 kHz met 30 dB per decade verzwakt? Een transversaal filter kan de klus klaren! Wilt u een heel scherp filter dat alleen 1 kHz doorlaat? Ook dat probleem is op te lossen met een dergelijk filter.
Zoals alles dat vrijwel ideaal is, stellen ook transversaal filters nogal wat eisen aan diegenen die het willen toepassen. Op de eerste plaats is het berekenen van een dergelijk filter een klus waar zelfs professionele wiskundigen hun lol mee op kunnen. Op de tweede plaats is de elektronica die noodzakelijk is voor het realiseren ervan uiterst complex. Als u echter genoegen neemt met een frequentiebereik dat alleen het audiogebied bestrijkt, dan kunt u transversaal filters samenstellen met emmertjesgeheugens.

De universele samenstelling van een transversaal filter
De algemene vorm van een transversaal filter is geschetst in de onderstaande figuur. Het ingangssignaal wordt aangeboden aan een serieschakeling van een aantal analoge vertragingslijnen met ieder een instelbare vertraging T_n. De aftakkingen tussen deze lijnen gaan naar een gewogen mengversterker. Dat gewogen duidt er op dat u ieder ingangssignaal van de menger kunt verzwakken met een bepaalde factor A_n. De factoren T_n en A_n bepalen

volledig de eigenschappen van het filter. Door aan alle A's en T's bepaalde waarden toe te kennen kunt u aan het filter iedere frequentiekarakteristiek geven die u kunt bedenken.
Door het toepassen van emmertjesgeheugens als analoge vertragingslijnen kunt u een LF-uitvoering van een transversaal filter realiseren. Alle emmertjesgeheugens bevatten identieke schakelingen. Natuurlijk moet ieder geheugen een eigen klokgenerator hebben met een instelbare frequentie. De frequentie van deze generatoren bepalen de factoren T_n. De stand van de lopers van de potentiometers definiëren de waarde van de factoren A_n.



Het blokschema van een transversaal filter met emmertjesgeheugens.
(© 2020 Jos Verstraten)